

раскрытия жаровой трубы и влечёт за собой ошибку в оценке расхода газа на режимах розжига и погасания камеры сгорания. Так в случае неучета отличий между  $P_{жт}$  и  $P_k$  для  $\mu F_0/F_k = 1,18 \dots 1,61$  погрешность оценки расхода газа на режимах бедного срыва составит 5...15 % при уровне перепадов давлений в распылителях  $\pi_{\phi}^* = 1,035 \dots 1,12$ . Очевидно, что такая погрешность оценки  $\pi_{\phi}^*$  и  $G_s$  при близости режимных и срывных величин  $\alpha$  во фронтном устройстве недопустима. Предлагаемая уточняющая зависимость позволяет её исключить. В заключении следует отметить, что полученная зависимость в силу её критериальности может быть применена и для других схем фронтных устройств камер сгорания.

УДК 536.46.

## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ АЛЮМИНИЕВО - ВОЗДУШНОГО ПОТОКА НА ГРАНИЦУ "БЕДНОГО" СРЫВА

Егоров А.Г.

*Тольяттинский политехнический институт*

Реализация проектов по созданию новых высокоэффективных двигательных установок во многом зависит от решения проблемы организации устойчивого горения порошкообразных металлических горючих (ПМГ) в турбулентном потоке газообразного окислителя. Одним из аспектов этой сложной проблемы является процесс стабилизации пламени, поскольку сложившиеся к настоящему времени представления о нем нельзя считать полностью законченными даже для гомогенных топливно-воздушных смесей (ТВС).

Имеющиеся экспериментальные данные по устойчивости горения получены в основном на стабилизаторах представляющие собой тела плохобтекаемой формы. Вместе с тем большой интерес представляют стабилизирующие устройства, в которых ЗР образуется при внезапном расширении канала, по которому движется горючая смесь. Если сечение канала до и после расширения круглое, то такое устройство называется камерой сгорания с внезапным расширением (КСВР) [1]. Такие стабили-

заторы при специальных условиях применения могут обеспечить определенные преимущества по сравнению с плохообтекаемыми телами.

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование процесса стабилизации пламени ПМГ в КСВР и определение влияния параметров алюминиево-воздушной потока на границу "бедного" срыва.

Подробное описание экспериментальных установок для изотермических исследований однофазных и двухфазных потоков в КСВР, а также конструкция стенда для огневых испытаний и методика испытаний представлены в [2]. Изотермические исследования проводились на моделях изготовленных из органического стекла, неизотермические – из металла и тугоплавкого стекла "Пирекс". Модели КСВР представляли собой осесимметричные каналы диаметром  $D_{\text{КС}} = 0,04...0,09 \text{ м}$  с входным отверстием диаметром  $d_0 = 0,02...0,04 \text{ м}$ . Относительная длина  $L_{\text{КС}}/d_0$  изменялась от 5,5 до 8,0, а степень внезапного расширения ( $r^* = R_{\text{КС}}/r_0$ ) варьировалась в диапазоне 2,0...4,5.

Уровень и масштаб турбулентности газодисперстного потока на входе в КСВР изменялся с помощью перфорированного диска (ПД) с коэффициентом живого сечения ( $f = 0,65$ ), который устанавливался во входном канале на различных расстояниях от плоскости внезапного расширения ( $l_{\text{но}}$ ). В качестве ПМГ использовались порошки алюминия (Al) марок АСД, ПА и др.

Для исследования гидродинамики течений двухфазного газодисперсного потока и определения времени пребывания частиц ПМГ в КСВР применялся оптический метод с использованием высокоскоростной киносъемки. Газодинамикой определяется полнота сгорания и количество токсичных выбросов в атмосферу, а также тепловое состояние стенок камеры сгорания. При исследовании гидродинамики течения в моделях КСВР особое внимание было уделено исследованию структуры течения в области отрыва до точки присоединения потока к стенке камеры сгорания. Были определены размеры ЗР и характер изменения скорости возвратного течения  $U_{\delta}$  в зоне обратных токов (ЗОТ).

Выявлено, что с уменьшением  $r^*$  величина максимальной скорости возвратного течения  $U_{\delta}$  увеличивается, а длина ЗР сокращается. Влия-

ние начального уровня турбулентности  $\varepsilon_0$  на размеры ЗР определяли сравнением ее длины при наличии ПД во входном канале и без него. Было получено, что с ростом  $\varepsilon_0$ , длина ЗР ( $L_{зр}$ ) уменьшается. Для расчета  $L_{зр}$  при трубной турбулентности в КСВР была получена формула  $L_{зр} = 4,5H$ , где  $H = D_{кс} - d_0$  характерный размер стабилизатора. Также было выявлено, что относительная длина ЗР  $\bar{L}_{зр} = L_{зр}/H$  не зависит от  $r^*$ .

Время пребывания реагентов в ЗР является одним из основных параметров, определяющих стабилизацию пламени в потоке горючей смеси. По величине среднего времени пребывания смеси в зоне обратных токов (ЗОТ) можно определить коэффициент турбулентного обмена ЗР и основного потока ТВС [3].

Для выявления количественных и теоретических зависимостей по тепло и массообмену между основным потоком АВС и окружающей его ЗР были измерены значения среднего времени пребывания частиц Al в ЗОТ ( $\bar{\tau}_{нр}$ ). Было получено, что  $\bar{\tau}_{нр}$  увеличивается с ростом  $r^*$ ,  $\bar{d}_{32}$  и уменьшается с увеличением  $U_0$  и  $\varepsilon_0$  основного потока АВС.

Эмпирически значения  $\bar{\tau}_{нр}$  позволили рассчитать по методике [3] безразмерное время пребывания частиц Al в ЗР ( $Z$ ). Для расчета  $\bar{\tau}_{нр}$  частиц Al с  $\bar{d}_{32} = 5...12 \text{ мкм}$ . в ЗР КСВР была получена формула:

$$\bar{\tau}_{нр} = 22,5 H/U_0,$$

где  $H$  – характерный размер стабилизатора,  $U_0$  – скорость основного потока АВС, 22,5 – коэффициент пропорциональности (безразмерное время пребывания  $Z$ ). В работе [4] отмечено, что полученные характеристики турбулентного потока в осесимметричном канале с внезапным расширением позволили определить  $\bar{\tau}_{нр}$  газа в ЗР по формуле:

$$\bar{\tau}_{нр} = 23,8(D_{кс} - d_0)/U_0.$$

При горении значение  $Z$  для частиц Al по сравнению с холодным потоком увеличивается  $\sim$  в 2,2 раза. Эта величина для гомогенной ТВС в двумерном канале с внезапным расширением составляет 2,1 [5]. Эта корреляция показывает, что процесс турбулентного обмена ЗР с основ-

ным потоком АВС с размером частиц  $Al \bar{d}_{32} = 5...12 \mu m$ , также как и гомогенной ТВС, можно оценивать параметром  $Z$ .

Многообразие факторов, определяющих процесс стабилизации пламени неоднородной по составу и фазе смеси, обуславливает чрезвычайную трудность изучения механизма этого сложного явления. Детальное исследование влияния различных факторов на стабилизацию пламени ПМГ позволит разработать физическую модель изучаемого процесса, с помощью которой можно будет определить качественные закономерности и получить некоторые количественные соотношения.

Известно [1], что любое увеличение скорости потока неизбежно оказывает отрицательное воздействие на устойчивость горения. Влияние скорости основного потока  $U_0$  на "бедный" предел устойчивого горения ПМГ демонстрируется на рис. 1. Из рисунка видно, что увеличение скорости сужает диапазон составов АВС, внутри которого возможно устойчивое горение.

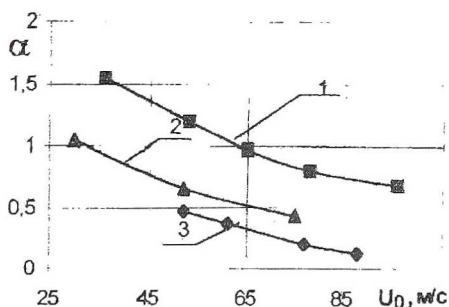


Рис. 1 Влияние скорости основного потока  $U_0$  на "бедный" предел устойчивого горения.

ПМГ марки АСД-1:

1 - КСВР диаметром 0.06 м;

2 - КСВР диаметром 0.05 м;

3 - КСВР диаметром 0.04 м.

При гомогенной реакции зависимость скорости пламени от начальной температуры горючей смеси обычно близка квадратичной. В газовзвесьях  $Al$  в интервале температур 250...600 К, эта зависимость значительно слабее. Однако с приближением начальной температуры среды к температуре самовоспламенения частиц (1300 К) теория предсказывает резкое усиление зависимости [6].

Влияние начальной температуры воздуха на "бедный"

предел устойчивого горения ПМГ марки АСД-1 представлено на рис.2. Из рисунка видно, что с увеличением температуры воздуха можно работать на более "бедных" АВС.

Вопрос влияния  $\varepsilon_0$  на устойчивость горения гетерогенных ТВС, остается в настоящее время открытым. Это обусловлено, во-первых, слож-



ной гидродинамикой двухфазного турбулентного потока, во-вторых, различием механизмов срыва пламени гомогенных и гетерогенных ТВС. На рис.3 показано влияние  $\varepsilon_0$  на диапазон устойчивого горения ПМГ марки АСД-1 в КСВР диаметром 0,06м. Как видно из рисунка рост  $\varepsilon_0$  ведет к расширению области устойчивого горения, как по скорости набегающего потока, так и по составу смеси.

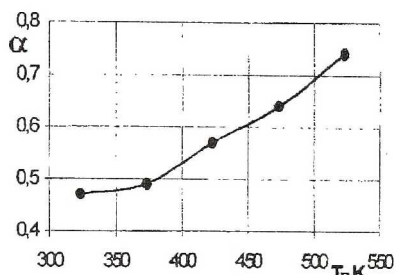


Рис. 2. Влияние температуры воздуха АВС на "бедный" предел устойчивого горения. ПМГ марки АСД-1.

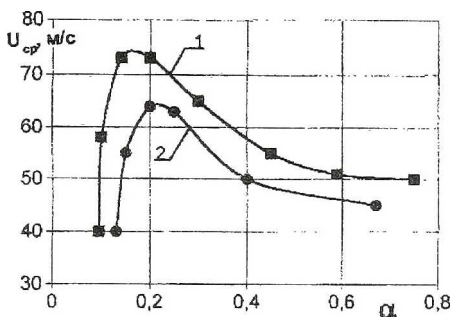


Рис. 3. Влияние начальной турбулентности  $\varepsilon_0$  на диапазон устойчивого горения. ПМГ марки АСД-1. КСВР диаметром 0.06м; 1 -  $\varepsilon_0 = 22\%$ ; 2 -  $\varepsilon_0 = 12\%$ .

В результате проведения многочисленных экспериментов было установлено, что с увеличением  $\varepsilon_0$  в зависимости от диаметра частиц ПМГ, граница бедного срыва может, как расширяться, так и сужаться. Для ПМГ марки АСД-4 с  $\bar{d}_{32} = 5 \text{ мкм}$ , увеличение  $\varepsilon_0$  с 5% до 22% приводит к сужению границы "бедного" срыва, а для АСД-1 с  $\bar{d}_{32} = 12 \text{ мкм}$ , наоборот, к расширению. Было выявлено, что для одного и того же ПМГ неоднозначное влияние на границу "бедного" срыва оказывает параметр,  $l_{\text{no}}$  от которого зависит масштаб турбулентности.

В отличие от гомогенных смесей, у которых зона химических реакций формируется в узкой полосе вдоль ЗР, в исследуемом случае горение протекает и в ЗР, в местах контакта частиц Al с воздухом. Турбулентность интенсифицирует обменные процессы между основным потоком АВС и ЗР, и тем самым воздействует на локальное соотношение компонентов в ЗР, от которого в свою очередь зависит скорость распространения пламени в аэрозвеси Al.

Известно [1], что скорость потока при срыве пламени увеличивается и пределы устойчивого горения по составу смеси расширяются при улучшении распыливания топлива т. е. при уменьшении среднего размера капель. Для определения влияния размера частиц АІ на устойчивость горения ПМГ в качестве моодисперсного состава были отобраны порошки марки АСД-4 и АСД-1 с  $\bar{d}_{32}$  соответственно 5 и 12 мкм. На рис. 4 показано влияние размера частиц ПМГ на границу "бедного" срыва. С уменьшением  $\bar{d}_{32}$  частиц АІ граница "бедного" срыва расширяется и растет  $U_{ср}$ . Характер влияния размера частиц на границу "бедного" срыва не изменился, когда в качестве ПМГ использовались порошки марки ПА-4 с частицами в форме пластин.

Результаты испытаний показали, что в полидисперсной АВС, с уменьшением содержания мелких и увеличения крупных частиц, граница "бедного" срыва сужается.

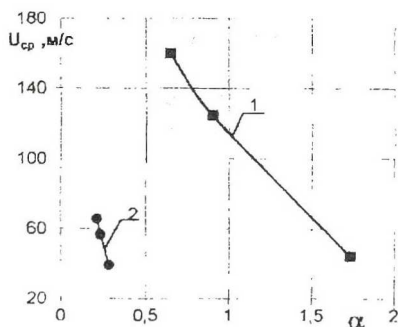


Рис. 4. Влияние размера частиц ПМГ на границу "бедного" срыва.  
КСВР диаметром 0.04 м

1 – ПМГ марки АСД-4 ( $\bar{d}_{32}=5$  мкм);

2 – ПМГ марки АСД-1 ( $\bar{d}_{32}=12$  мкм).

Для получения оптимальных характеристик горения используются металлы высокой чистоты. Однако при решении практических задач некоторые добавки используют умышленно. Одной из добавок которая наиболее часто применяется, является магний (Mg). Mg, один из металлов, который активизирует горение АІ и в тоже время сравнительно слабо снижает энергетические возможности металла как составного компонента ракетных топлив.

Влияние добавки Mg, на "бедную" границу устойчивого горения было исследовано на ПМГ марки АМД-50, частицы которого представляют собой сплав 50% АІ и 50% Mg. Результаты испытаний показали, что для ПМГ марок АМД-50 и АСД-4, с одинаковым размером частиц  $\bar{d}_{32} = 5$  мкм, граница "бедного" срыва для АМД-50 шире чем для АСД-4. Это объясняется тем, что время горения частиц сплава зависит

от соотношения содержания Al и Mg, и по мере повышения доли Mg в сплаве оно уменьшается, постепенно приближаясь к времени горения чистого Mg, которое при одинаковых условиях и равновеликих размерах частиц меньше горения Al примерно  $\sim 3$  раза [7].

Было установлено, что для ПМГ также как и для газообразных и жидких горючих с увеличением характерного размера  $H$  растет скорость основного потока ABC, при которой наступает срыв пламени  $U_{cp}$  и расширяются пределы устойчивого горения по составу смеси (рис. 5). Увеличение  $H$  приводит к смещению области устойчивого горения в сторону "бедных" смесей. В отличие от гомогенных и гетерогенных углеводородо-воздушных смесей границы "бедного" и "богатого" срывов для ABC лежат в области  $\alpha < 1$ . Максимальное значение  $U_{cp}$  соответствует  $\alpha \approx 0,15 \dots 0,2$ , т.е. тому значению при котором скорость пламени и тепловыделение максимальны [8]. Было установлено, что при горении ABC в КСВР, также как и для жидких гетерогенных топлив за телами V-образной формы справедливо соотношение  $U_{cp}/H = f(\alpha)$ .

Для получения эмпирических зависимостей, пригодных для инженерного расчета размера стабилизатора, обеспечивающего надежную стабилизацию пламени ПМГ при известных параметрах ABC, были обработаны

полученные экспериментальные данные в области "бедного" срыва. Зависимость  $U_{cp}/H = f(\alpha)$  для различных марок ПМГ представлена на рис. 6. Было получено, что если  $U_{cp}/H = Const$ , диапазон устойчивого горения по составу смеси расширяется с уменьшением  $\bar{d}_{32}$  частиц ПМГ.

На рис. 7 приведены срывные характеристики на "бедных" смесях, обработанные в безразмерных координатах

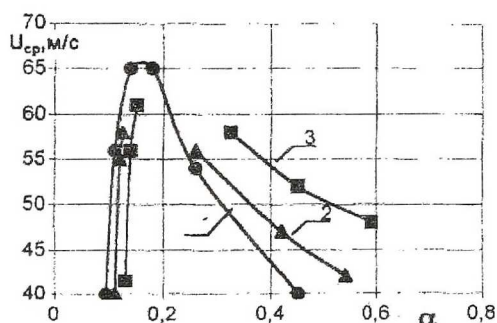


Рис. 5. Влияние характерного размера  $H$  на пределы устойчивого горения. ПМГ марки АСД-1  
1 —  $H = 20$  мм; 2 —  $H = 30$  мм;  
3 —  $H = 40$  мм.

$$U_{ср}/U_{0ср} = f(\alpha_{0ср}/\alpha_{ср})$$

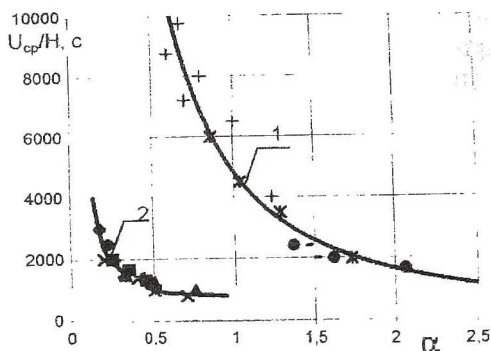


Рис. 6. Зависимость  $U_{ср}/H = f(\alpha)$  для "бедной" границы срыва.  
1- ПМГ марки АСД-4 и АМД-50;  
2- ПМГ марки АСД-1.

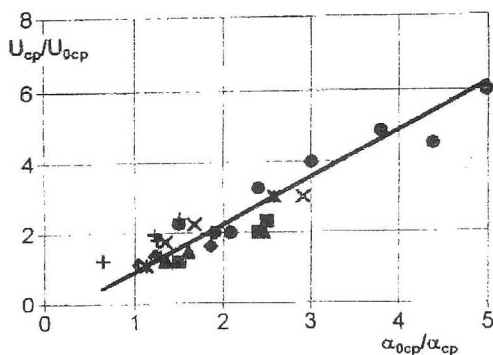


Рис. 7. Зависимость  $U_{ср}/U_0 = f(\alpha_{0ср}/\alpha_{ср})$  для "бедной" области устойчивого горения.

для различных марок ПМГ и размеров стабилизаторов при атмосферном давлении и температуре. Для всех рассмотренных случаев экспериментальные точки удовлетворительно группируются вокруг одной прямой, аппроксимируемой зависимостью

$$\alpha_{0ср}/\alpha_{ср} = 0,32 + 0,752 U_{ср}/U_{0ср},$$

где  $U_{0ср} = 40$  м/с - постоянное значение скорости потока АВС, при которой происходит срыв пламени при том или ином значении  $\alpha_{0ср}$ , зависящем от размера  $H$ , температуры и т.д.;  $\alpha_{0ср}$  - состав АВС, при котором происходит срыв пламени при  $U_{0ср} = 40$  м/с;

$U_{ср}$  и  $\alpha_{ср}$  соответственно скорость, и состав АВС, при которой происходит срыв пламени, если  $U_{ср} > 40$  м/с.

Полученное соотношение можно использовать для расчета стабилизации пламени ПМГ, если будет известна зависимость  $\alpha_{0ср}$  от различных факторов, определяющих срыв пламени при горении "бедных" АВС - характерного размера  $H$ , температуры и т. д.



В общем, скорость потока при срыве пламени увеличивается, и пределы устойчивого горения по составу АВС в "бедной" области расширяются:

- при увеличении характерного размера  $H$ ;
- при уменьшении скорости основного потока АВС;  
при увеличении температуры воздуха АВС;
- при уменьшении размера частиц  $Al$ ;
- при добавке  $Mg$  в состав частицы  $Al$ .

Увеличение начальной турбулентности основного потока расширяет границу срыва в "бедной" области ПМГ с размером частиц  $Al$   $\bar{d}_{32} = 12 \text{ мкм}$  и сужает с  $\bar{d}_{32} = 5 \text{ мкм}$ .

Полученный в настоящей работе экспериментальный материал и корреляция его с известными данными позволяет сделать вывод о том, что процесс стабилизации пламени ПМГ должен рассматриваться с позиций механизма стабилизации пламени распыленного жидкого горючего в газовом потоке который в свою очередь базируется на теориях стабилизации пламени гомогенных ТВС.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД – М.: Мир, 1986, - 204с.
2. Егоров А.Г. Стабилизация пламени псевдожидкого топлива в камере сгорания с внезапным расширением.: Дис...канд. техн. наук. – Казань, 1993. – 150с.
3. Бовина Т.А. Исследование обмена между зоной рециркуляции за стабилизатором и внешним потоком и некоторые вопросы стабилизации пламени// Доклад АН СССР, 1955.
4. Левин А.М. Принципы рационального сжигания газа. Л.: Недра, 1977. – 247с.
5. Малая Э.М. Аэродинамика, процессы горения и теплообмена ограниченных струйных течений. – Саратов, Саратовский университет, 1987, 160с.
6. Руманов Э.Н., Хайкин Б.И.// Доклад АН СССР, 1971, - 201, №1. – С. 144 – 147.
7. Похил П.Ф., Беляев А.Ф., Фролов Ю.В., Логачев В.С., Коротков А.И. Горение порошкообразных металлов в активных средах. М.: Наука, 1972. – 293с.
8. Ягодников Д.Я., Сухов А.В., Малинин В.И., Кирьянов И.М. Роль реакции азотирования в распространении пламени по переобогащенным металловоздушным смесям// Вестник МГТУ, серия Машиностроение, 1990. - №1. – С. 121-124.